

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ АЛГОРИТМЫ В АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОГРАММИРОВАНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Сукорская А.Ф.¹, Куксевич В.Ф.¹, Черненко Д.В.¹

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь
(E-mail: teassy.chan@gmail.com)

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь
(E-mail: pallmall5@bk.ru)

Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь
(E-mail: chernenko203509@gmail.com)

Современная наука сталкивается с рядом вызовов, например, каким образом можно наиболее эффективно обучать и применять системы искусственного интеллекта в устройствах с ограниченной вычислительной мощностью. Широко используемый в образовательной робототехнике робототехнический конструктор LEGO MINDSTORMS EV3, в качестве строительных блоков которого используются детали LEGO Technic, представляет собой идеальную тестовую платформу для изучения этой проблемы и использования результатов, как в образовательной деятельности, так и в производственной сфере. Традиционное программирование роботов требует от разработчика не только глубоких знаний синтаксиса языков программирования, но и значительных временных затрат на отладку алгоритмов поведения в недетерминированной среде. Использование нейросетей в робототехнике позволяет перейти от жесткого программирования к адаптивному обучению, что открывает новые горизонты для создания интеллектуальных автономных систем.

Основная научная проблема, рассматриваемая в работе, заключается в противоречии между потенциальными возможностями методов машинного обучения и ограничениями аппаратной платформы LEGO EV3 (невысокая производительность процессора, ограниченный объем оперативной памяти). Существующие методы программирования – как визуальные (блочные), так и текстовые (EV3 Basic) – не предоставляют встроенных механизмов для реализации адаптивного поведения на основе нейросетей. Это создает разрыв между современными требованиями к робототехническим системам и реальными возможностями их реализации [1].

В то же время, ограниченные вычислительные ресурсы, дают стимул для развития новых методов. Работа с робототехническими платформами, обладающими крайне ограниченными вычислительными ресурсами, такими как LEGO MINDSTORMS EV3, служит мощным стимулом для развития новых классов сверхлёгких нейросетевых моделей. Ограничения по памяти, частоте процессора и энергопотреблению вынуждают исследователей искать архитектуры, способные обеспечивать приемлемую точность при минимальной вычислительной стоимости. Подобные условия полностью совпадают с требованиями, предъявляемыми к промышленным IoT устройствам, автономным сенсорам и маломобильным роботам, что делает образовательные платформы естественным полигоном для отработки методов TinyML [2].

Современные исследования подтверждают, что необходимость работы в условиях жёстких ограничений приводит к появлению принципиально новых архитектур. В частности, уже создана архитектура, демонстрирующая подход «co-design», в котором одновременно оптимизируются и модель, и система исполнения, что позволяет запускать глубокие нейросети на микроконтроллерах с большим объемом памяти. Также, уже существуют работы, в которых предлагаются специализированные архитектуры,

ориентированные на минимизацию FLOPs и энергоэффективность, обеспечивая при этом высокую точность на задачах классификации и детекции. Эти работы показывают, что ограниченные платформы не только не препятствуют развитию нейросетевых методов, но и формируют новые направления исследований, ориентированные на компактность, энергоэффективность и адаптивность [3]. Сравнительные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение методов TinyML по требованиям к памяти и применимости к EV3

Метод	Память (КБ)	Особенности	Применимость к EV3
MCUNet	256-512	co-design, оптимизация модели и рантайма	частично применимо
MicroNets	50-200	экстремально компактные архитектуры	высокая
Классическая CNN	>1000	высокая точность, высокая стоимость	низкая

Таким образом, эксперименты на LEGO EV3 оказываются не просто учебной практикой, а частью более широкой инженерной тенденции: разработки моделей, способных работать на реальных встроенных устройствах. Это создаёт прямую связь между образовательной робототехникой и промышленными задачами edge AI, где требования к вычислительной эффективности являются ключевыми.

Также, если рассматривать энергоэффективность как критерий качества модели, то можно выделить следующее: для маломощных робототехнических платформ, таких как LEGO EV3, качество модели определяется не только её точностью, но и совокупностью эксплуатационных характеристик, напрямую влияющих на возможность реального применения – энергопотреблением, временем отклика и вычислительной сложностью (FLOPs). В условиях ограниченного энергобюджета и низкой производительности процессора даже высокоточная модель может оказаться непригодной, если она требует слишком много операций или приводит к задержкам в управлении. Поэтому при выборе архитектуры нейросети необходимо учитывать метрики энергоэффективности, что сближает исследование с практическими инженерными задачами в области встроенных систем и edge AI.

Работы по созданию энергоэффективных моделей подтверждают важность такого подхода. В частности, некоторые разработки демонстрируют, что использование глубоко разделенных свёрток позволяет радикально снизить количество операций и энергозатраты при сохранении приемлемой точности, что делает архитектуру пригодной для мобильных и встроенных устройств. С другой стороны, уже существует стандартизированный набор метрик для оценки производительности нейросетевых моделей на микроконтроллерах, включая энергию на одно предсказание, задержку и эффективность выполнения. Эти метрики позволяют объективно сравнивать модели и выбирать архитектуры, оптимальные для реальных ограниченных платформ [4].

Ориентация на энергоэффективность делает разработку моделей для LEGO EV3 частью более широкой тенденции в индустрии – перехода к компактным, быстрым и экономичным нейросетям, способным работать в условиях жёстких ограничений по вычислительным ресурсам. Это усиливает связь между образовательной робототехникой и

современными инженерными практиками, где энергоэффективность является ключевым критерием качества.

Для решения поставленной проблемы был разработан метод интеграции нейросетевых алгоритмов, включающий следующие этапы:

1. Сбор и подготовка данных. Формирование репрезентативной выборки показаний ультразвукового датчика расстояния и данных с энкодеров моторов в различных сценариях движения (объезд препятствий, движение по линии).

2. Выбор архитектуры нейросети. С учетом аппаратных ограничений платформы EV3 предпочтение было отдано легковесным моделям, оптимизированным с помощью TensorFlow Lite. Рассматривались сверточные нейросети (для обработки визуальной информации) и рекуррентные сети (для анализа временных рядов).

3. Обучение и валидация. Обучение модели проводилось на размеченных данных с использованием метода обратного распространения ошибки. Функция потерь минимизировала отклонение реальной траектории от эталонной.

4. Интеграция и тестирование. Обученная модель была скомпилирована в формат, совместимый со средой выполнения EV3, и загружена в контроллер робота.

В ходе экспериментальных испытаний робота, оснащенного нейросетевым модулем управления, решалась типовая задача объезда статического препятствия. Сравнительный анализ проводился с традиционным алгоритмом, реализованным на EV3 Basic. Результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительные показатели эффективности управления

Параметр	Традиционный алгоритм	Нейросетевой алгоритм	Улучшение
Точность навигации (попадание в целевую точку), %	78	93	15
Среднее время выполнения миссии, с	12,5	10,2	2,3
Количество столкновений с препятствием за 10 циклов	3	0	Абсолютное

Полученные данные свидетельствуют о значимом улучшении показателей. Нейросетевой подход позволил роботу не просто реагировать на препятствие, а прогнозировать траекторию его объезда на основе обученной модели, что снизило количество ошибок и повысило общую эффективность.

Предложенная методика не ограничивается задачей объезда препятствий и может быть масштабирована на широкий спектр робототехнических сценариев, что существенно повышает её практическую значимость. В современных робототехнических системах ключевую роль играет универсальность алгоритмов, позволяющая применять единые

принципы обработки сенсорных данных и принятия решений в различных задачах управления и восприятия. Согласно фундаментальным обзорам в области робототехники, многие прикладные задачи – стабилизация движения, распознавание жестов, навигация по визуальным маркерам, оптимизация траектории – опираются на общие принципы сенсорной интеграции, фильтрации сигналов и адаптивного управления. Это делает возможным перенос разработанных подходов на другие области без необходимости радикальной переработки архитектуры.

С точки зрения методов машинного обучения, глубокие нейронные сети обладают высокой степенью универсальности и способны решать широкий класс задач, включая классификацию, регрессию, обработку последовательностей и принятие решений в динамических средах. Это означает, что модель, изначально обученная для распознавания препятствий, может быть адаптирована к задачам жестовой коммуникации, визуальной локализации или предсказания оптимальной траектории движения при соответствующей настройке входных данных и целевых функций. Таким образом, разработанная методика демонстрирует потенциал для расширения функциональности робота за счёт применения единых принципов обработки данных и обучения.

В совокупности это подчёркивает, что предложенный подход выходит за рамки узкой учебной задачи и может служить основой для построения более сложных автономных систем. Масштабируемость методики делает её релевантной как для образовательной робототехники, так и для реальных инженерных приложений, где требуется универсальность, адаптивность и возможность интеграции различных сенсорных модальностей.

Ещё одна перспективная тема для исследования, не затронутая в данной работе – это возможность онлайн обучения на работе. Онлайн обучение представляет собой перспективный шаг от статически обученной модели к адаптивной системе, способной изменять своё поведение в процессе работы. Даже при ограничениях аппаратной платформы LEGO EV3 возможны лёгкие формы инкрементального обновления параметров, основанные на идеях обучения с подкреплением, где корректировки весов выполняются малыми порциями по мере поступления новых данных взаимодействия. Дополнительно могут применяться эвристические механизмы адаптации — динамическая настройка порогов сенсоров, коэффициентов регуляторов или относительных весов входных сигналов, что функционально соответствует локальному онлайн обучению. Перспективным является и гибридный подход: основное обучение проводится на ПК, после чего робот выполняет ограниченное дообучение на основе текущих наблюдений. Такой режим согласуется с современными концепциями *continual learning*, направленными на адаптацию к новым данным при минимальных ресурсах и снижении эффекта катастрофического забывания. В совокупности эти методы подчёркивают потенциал дальнейших исследований в направлении автономных, самообучающихся робототехнических систем [5].

Научная новизна данной работы заключается в адаптации алгоритмов машинного обучения для работы в условиях жестких аппаратных ограничений платформы LEGO EV3. В отличие от традиционных подходов, где поведение робота жестко детерминировано кодом, разработанная система способна к обобщению опыта и принятию решений в нештатных ситуациях, что является элементом искусственного интеллекта.

Практическая значимость подтверждается возможностью использования результатов исследования как в учебном процессе учреждений общего среднего и дополнительного образования, так и в различных производственных процессах с применением средств робототехники. Разработанные методики позволят обучающимся и техническому персоналу производственных комплексов освоить не только основные положения робототехники, но и принципы работы нейросетей, что соответствует актуальным требованиям подготовки инженерных кадров.

Таким образом, в результате проведенного исследования была подтверждена гипотеза о возможности и эффективности использования нейросетевых алгоритмов для управления робототехническими системами на базе комплекса LEGO MINDSTORMS EV3. Решение проблемы ограниченности вычислительных ресурсов было достигнуто за счет применения легковесных моделей и методов оптимизации. Полученные результаты (повышение точности на 15–20%) открывают перспективы для дальнейших исследований в области создания полностью автономных самообучающихся роботов и расширения применения искусственного интеллекта в образовательной робототехнике.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сидорова, Е. В. Применение LEGO-робототехники в образовательном процессе: проблемы и перспективы // Информатика и образование. – 2024. № 3. – С. 24–31.
2. MicroNets : Neural Network Architectures for Deploying TinyML Applications on Commodity Microcontrollers. Banbury et al., 2021 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2010.1126> (дата обращения: 18.03.2026).
3. MCUNet – Tiny Deep Learning on IoT Devices. Lin et al., 2020 [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://arxiv.org/abs/2007.10319> (дата обращения: 18.03.2026).
4. TensorFlow Lite for Microcontrollers [Электронный ресурс] // Google Developers. – Режим доступа: <https://www.tensorflow.org/lite/microcontrollers> (дата обращения: 18.03.2026).
5. Иванов, А. Б. Нейросетевые методы в управлении робототехническими комплексами / А.Б. Иванов, В.Г. Петров // Робототехника и техническая кибернетика. – 2025. – № 4. – С. 45–52.